

干旱对中国北方草原总初级生产力影响的时滞和累积效应

乌日娜¹, 刘步云¹, 包玉海^{2,3}

(1. 辽宁师范大学地理科学学院, 辽宁 大连 116029; 2. 内蒙古师范大学地理科学学院, 内蒙古 呼和浩特 010022; 3. 内蒙古自治区遥感与地理信息系统重点实验室, 内蒙古 呼和浩特 010022)

摘要: 近年来随着全球变暖, 干旱事件的增加对植被的光合作用产生更加重要的影响, 同时也严重影响了陆地生态系统的平衡。本文基于标准化降水蒸散指数(SPEI base v.2.7)和总初级生产力数据集(GOSIF GPP)研究了中国北方草原GPP的累积和时滞效应, 利用Sen's斜率、Mann-Kendall(MK)趋势检验、Mann-Kendall突变检验研究了GPP和SPEI在研究期内的时空变化, 利用Pearson相关分析方法探究了干旱对北方草原GPP的累积和时滞效应。结果表明: (1) 2001—2020年期间北方草原多年平均GPP呈现东北地区高、西南地区低的空间分布格局, 多年平均SPEI呈现东北地区低、西南地区高的空间分布格局, 且SPEI和GPP的年平均值都随时间变化呈现上升趋势。(2) 干旱对北方草原84.99%的区域有累积效应, 最长累积时间尺度主要集中在3~4个月, 覆盖北方草原的39.82%; 干旱对北方草原63.11%的区域有滞后效应, 且主要发生在7个月, 覆盖北方草原的19.73%。(3) 通过对比不同水分条件下二者的变化趋势, 发现干旱对草原GPP的累积效应强于时滞效应。

关键词: 中国北方草原; 干旱; 总初级生产力; 时滞效应; 累积效应

在过去的几十年里, 全球的草原气候发生了重大的变化, 并且这一现象在未来将会持续^[1]。20世纪70年代以来, 由于大气环流系统从对流层到平流层发生了明显的变化, 使得中国北方干旱化趋势增强, 干旱事件频发, 并且多年持续发生大范围干旱^[2]。同时, 中国西北地区的干旱强度和持续时间在未来将继续增强和增加^[3]。植被总初级生产力(GPP)被定义为单位时间内植物/生物通过光合作用途径所固定的有机碳量, 是判定碳源/汇和生态调节过程的主要因子, 也能促进生态系统碳循环^[4-5]。相关研究表明, 干旱是对陆地生态系统总初级生产力影响最强烈的极端气候^[6]。干旱引发的水分胁迫会导致植被缺水, 阻碍植被生长发育, 同时诱发植被生理特征和结构功能的变化; 而长期持续干旱可导致植被死亡甚至生态系统退化^[7-9]。世界草地面积约占全球土地总面积的25%, 其中, 草原是最脆弱的生态系统之一, 易受气候变化和人为干扰的影

响, 气候因素的变化包括温度降水和太阳辐射, 对草地生长和草原畜牧业的发展有着显著的影响^[10]。

植被对气候的响应过程往往是复杂的, 一般在干旱发生时, 会对生态系统产生滞后、累积、遗留等效应来影响植被的生长状况。干旱的累积效应是指一段时间(跨越几个月甚至数年)的缺水对植被生长产生的影响, 即土壤中持续存在水分胁迫, 可用于评估植被对干旱的耐受性^[11]; 遗留效应为先前干旱条件对当前植被生长的影响, 例如前一年的干旱导致植被生产力下降^[12]; 滞后效应是指干旱不仅对当前的植被产生影响, 即在时间上存在一定的滞后性^[13]。比如植被生长可能会受到前一个月甚至几个月的影响比当前月的影响更为显著。Kolus等^[14]研究发现, 干旱会通过影响森林中造成树木的死亡因子, 进而破坏森林生态系统的稳定性。同时得出植被对干旱的响应具有一定的时间滞后性, 即存在时滞效应^[15-16]; Zuo等^[17]通过研究干旱对青藏高原高

收稿日期: 2023-03-23; 修订日期: 2023-08-23

基金项目: 2021年大连市科技之星工程(2021RQ101); 国家自然科学基金(42261144746)

作者简介: 乌日娜(1988-), 女, 博士, 讲师, 主要从事自然灾害风险评估。E-mail: wurina@lnnu.edu.cn

通讯作者: 包玉海。E-mail: baoyuhai@imnu.edu.cn

寒流域植被动态的时滞效应,发现上中游的时滞效应存在差异,在上游滞后为一个月。很多研究发现,干旱对植被覆盖指数(NDVI)产生滞后和累积效应^[18]。Peng等^[15]研究发现,干旱对秋季物候具有较强的累积效应和滞后效应;顾锡羚等^[19]基于标准化降水蒸散指数SPEI和NDVI探究干旱对植被的影响,研究发现干旱对植被生长产生的累积效应大于滞后效应;van der Molen等^[20]系统地探讨了干旱的频率、持续时间和干旱等级对GPP的影响,研究表明干旱对GPP的影响具有直接和滞后效应。

干旱会通过影响植被的生长发育导致其生态系统生产力下降,进而干扰大气与生态系统之间的碳水交换,植被GPP作为表征碳汇系统的重要指标,可以直接反映植被的实际光合作用,对干旱条件的响应更加敏感^[21],经常被用来表征干旱对植被的影响^[22-23]。而中国北方草原植被对降水的响应十分敏感^[24],植被种类丰富,是中国甚至南亚地区重要的生态保护屏障^[25]。由于其特殊的地理环境,生态系统较为脆弱,抗干扰能力差,受干旱影响较大^[26-27],因此,本文旨在通过研究中国北方草原不同草原类型的GPP和SPEI之间的关系,探讨干旱对不同草原类型GPP的时滞效应和累积效应,进而了解其作用机制,为减轻干旱对草原总初级生产力的影响提供有效的策略。

1 研究区与数据

1.1 研究区概况

研究区位于中国北方草原(26°50′~53°23′N, 73°33′~126°04′E),面积约为 $3.13 \times 10^6 \text{ km}^2$,占全国草原面积的79.7%,年均温在-3.1~8.9℃之间,年均降水量在31.46~898.04 mm之间,主要包括了内蒙古自治区、甘肃省、宁夏回族自治区、新疆维吾尔自治区、青海省和西藏自治区这6个省或自治区。中国北方地区草原类型众多,包括高寒草甸、温带草甸、高寒草原、荒漠草原、典型草原和草甸草原(图1),该区域受气候变化和人类活动的影响,属于干旱和半干旱地区,生态环境脆弱^[24]。

1.2 GOSIF GPP数据

GOSIF使用基于OCO-2的全球SIF产品(GOSIF),绘制出的空间分辨率为0.05°,时间尺度为8 d全球GPP数据集。Li等^[28]使用了8种不同形式的

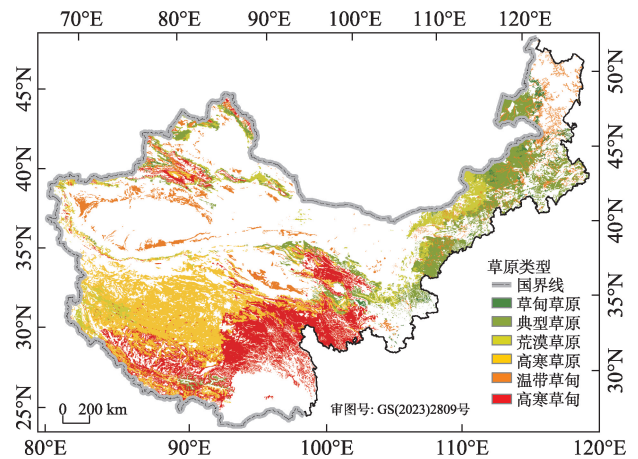


图1 中国北方草原的地理位置

Fig. 1 Geographical location of grasslands in northern China

SIF-GPP关系来估计GPP,由GOSIF数据反演得到2001—2021年的全球GPP数据集。本研究使用的是2001—2020年中国北方草原区的GOSIF GPP月尺度数据和年尺度数据(<http://globalecology.unh.edu>)。

1.3 植被类型数据

植被类型数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心(<https://www.resdc.cn>)的1:1000000植被类型数据集,利用ArcGIS 10.2将其进行重分类后,按掩膜提取出研究区域,最后将中国北方草原区植被类型划分为6大类,即草甸草原、典型草原、荒漠草原、高寒草原、温带草甸和高寒草甸。

1.4 SPEI数据集

标准化降水蒸散指数SPEI(Standardized Precipitation Evapotranspiration Index)数据集是用来量化干旱的严重程度和持续时间^[29],本研究用SPEI来表征中国北方草原地区的干旱状况,该数据来自于DIGITAL CSIC(<https://digital.csic.es/handle/10261/268088>)所提供的0.5°分辨率的覆盖全球范围的标准化降水蒸散指数数据集SPEI base v2.7。该数据集包括了1901—2020年的1~48个月时间尺度的SPEI数据,其等级划分如表1所示。本研究选取1~12个月尺度的SPEI数据集进行研究,对数据进行预处理,将其插值成与GOSIF GPP相同的空间分辨率。

2 研究方法

2.1 趋势分析与Mann-Kendall(MK)检验

Theil-Sen Median方法又被称为Sen's斜率估

表1 SPEI干旱指数等级划分

Tab.1 SPEI drought index classification

| 干旱水平 | SPEI值 |
|------|--------------------------------|
| 极端干旱 | $\text{SPEI} \leq -2.0$ |
| 严重干旱 | $-2.0 < \text{SPEI} \leq -1.5$ |
| 中度干旱 | $-1.5 < \text{SPEI} \leq -1.0$ |
| 轻微干旱 | $-1.0 < \text{SPEI} \leq -0.5$ |
| 湿润 | $\text{SPEI} > -0.5$ |

计,是一种稳健的非参数统计的趋势计算方法。该方法计算效率高,对于测量误差和离群数据不敏感,常被用于分析长时间序列数据的趋势^[30]。

$$\beta = \text{Median} \left(\frac{x_j - x_i}{j - i} \right), \forall j > i \quad (1)$$

式中: β 为 Theil-Sen Median 趋势; x 代表 GPP 和 SPEI; i 和 j 为时间序列数据。Median 表示所求序列的中位数。 $\beta > 0$ 表示时间序列呈现上升趋势; 反之,表示时间序列呈现下降趋势。

Mann-Kendall(MK)检验是一种非参数统计检验方法,其优点是不需要样本服从正态分布,也不受缺失值和异常值的干扰,且计算方便,经常被用来分析长时间序列数据的趋势显著检验^[31]。在时间序列上其统计检验方法如下:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i) \quad (2)$$

$$\text{sgn}(x_j - x_i) = \begin{cases} 1, & x_j - x_i > 0 \\ 0, & x_j - x_i = 0 \\ -1, & x_j - x_i < 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中: S 为检验统计量; x_i 和 x_j 为第 i 年和第 j 年的 SPEI 和 GPP 的像元值; n 为时间序列的长度; sgn 为符号函数;统计量 S 在不同取值时,其趋势值计算公式如下:

$$Z = \begin{cases} \frac{S}{\sqrt{\text{Var}(S)}}, & (S > 0) \\ 0, & (S = 0) \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}}, & (S < 0) \end{cases} \quad (4)$$

$$\text{Var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \quad (5)$$

式中: $\text{Var}(S)$ 表示方差; Z 为标准化后的检验统计量,当 $|Z| > Z_{(1-\alpha)/2}$ 时,表明变化趋势显著。本文给定显著水平 $\alpha = 0.05$,当 $|Z| > 1.96$ 时,表示 SPEI 和 GPP 的变化趋势显著。

2.2 Mann-Kendall 突变检验

Mann-Kendall 方法还可以对气象数据进行突变检验,对于时间序列 x_1, x_2, \dots, x_n , 构造秩序列:

$$S_k = \sum_{i=1}^k r_i, \quad (k = 2, 3, \dots, n) \quad (6)$$

$$r_i = \begin{cases} 1, & x_i > x_j \\ 0, & x_i \leq x_j \end{cases} \quad (j = 1, 2, \dots, i) \quad (7)$$

式中: k 为样本数; r_i 表示样本 $x_i > x_j$ 的累计数; S_k 为突变检验统计量。在时间序列随机独立的假定下,定义统计量:

$$UF_k = \frac{[S_k - E(S_k)]}{\sqrt{\text{Var}(S_k)}}, \quad (k = 1, 2, \dots, n) \quad (8)$$

式中: $UF_1 = 0$; $E(S_k)$ 、 $\text{Var}(S_k)$ 是累计数 S_k 的均值和方差,在 x_1, x_2, \dots, x_n 相互独立,且有相同连续分布时,它们可以由下列公式计算得出:

$$E(S_k) = \frac{k(k-1)}{4} \quad (9)$$

$$\text{Var}(S_k) = \frac{k(k-1)(2k+5)}{72} \quad (10)$$

式中: UF 为标准正态分布,它是按时间序列 x 顺序 x_1, x_2, \dots, x_n 计算出的标准化统计量序列,给定显著水平 α ,根据正态分布表,若 $|UF_k| > U_\alpha$,则表明序列存在明显的趋势变化。当 $UF > 0$ 时,说明干旱呈现持续增长趋势,且值在 0.05 显著性水平线上,说明通过 0.05 显著性检验。当 UF 和 UB 曲线的交点在置信水平区间 $[-1.96, 1.96]$ 内,此时的相交点即为干旱发生突变的年份。

2.3 时滞效应

本文采用 Pearson 相关性来分析干旱对北方草原 GPP 的时滞效应,在每个滞后时间间隔 ($0 \leq i \leq 12$),先计算一个月尺度的 SPEI 与 GPP 之间的相关系数 ($r_0, r_1, r_2, \dots, r_{12}$),然后 r_i 达到最大时,则 r_i 被视为最强相关^[32], i 被视为最长相关月份。例如,滞后 3 个月,利用 2000 年 10 月至 2020 年 9 月逐月的 SPEI 数据和 2001—2020 年逐月 GPP 进行相关性分析。以此类推,如果 6 月的月 GPP 与当年 3 月的 1 个月 SPEI 之间的 r 最高,则滞后时间尺度为 3 个月,这代表 3 个月前的干旱条件对草原 GPP 产生的变化。

$$r_i = \text{corr}(\text{GPP}, \text{SPEI}_i), \quad 0 \leq i \leq 12 \quad (11)$$

$$r_{\max-\text{lag}} = \max(r_i), \quad 0 \leq i \leq 12 \quad (12)$$

式中: r_i 代表滞后 i 个月的 Pearson 相关系数; i 的范

围从0~12(0表示没有时滞效应,1~12分别表示时滞月份为1~12个月); $r_{\max-lag}$ 表示 r_i 的最大值;GPP是2001—2020年每月的GOSIF GPP时间序列;SPEI是2001—2020年1个月尺度的SPEI(SPEI01)。

2.4 累积效应

为了解释干旱对北方草原GPP的累积影响,采用Pearson相关分析计算相关系数 r 。这个分析的结果可以从-1~1,分别表示从负到正的相关性。在目前的研究中,GPP月份的Pearson相关系数($P<0.05$)和1~12个月时间尺度的累积SPEI被认为是评估干旱对草地植被累积影响的最佳候选^[32]。具有最大系数的月份长度被认为是干旱对草原植被的累积影响。例如GPP与5个月尺度的SPEI相关性最高,则5月就是最长累积时间。由此,可以得出干旱对GPP的最强累积效应和相应的月份。

$$r_j = \text{corr}(\text{GPP}, \text{SPEI}_j), 0 \leq j \leq 12 \quad (13)$$

$$r_{\max-cum} = \max(r_j), 0 \leq j \leq 12 \quad (14)$$

式中: r_j 代表GPP和SPEI之间的Pearson相关系数; j 是从1个月到12个月SPEI的累积时间; $r_{\max-cum}$ 是 r_j 的最大值。

为了评估水文条件对累积和滞后效应的潜在影响,本文选取2001—2020年的年度12月的SPEI-12作为年均水平衡条件,该数据可用于揭示年度湿度情况^[33]。同时,将年平均SPEI以等间隔值(0.1)划分水平衡梯度^[34],并将平均 $r_{\max-lag}/r_{\max-cum}$ 和对应的滞后/累积时间沿着水平衡梯度做回归分析,揭

示其随水分条件的变化情况(该部分本研究只选取了正相关像元参与统计,使结果更具有说服力)。

3 结果与分析

3.1 北方草原GPP空间分布和时空变化特征

3.1.1 GPP时间分布特征 从图2可以看出,中国北方草原2001—2020年年均GPP整体呈现上升趋势,波动范围在 $188.20 \text{ g C} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1} \sim 265.50 \text{ g C} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$,年增长率为 $2.7101 \text{ g C} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ 。采用Mann-Kendall突变分析法,对2001—2020年北方草原年均GPP进行突变检验,从图中还可以看出, UF 曲线在研究期内基本大于0,只有2007年小于0,表明研究区GPP呈现上升趋势,其中,2007年为下降点。 UF 与 UB 曲线在2011年附近相交,交点位于两个置信水平之间,表明研究区GPP变化趋势在2011年发生了一次突变,并在2012年通过0.05置信水平的显著性检验,此后研究区内GPP上升趋势显著。由于北方草原区植被类型较多,因此,本文主要分析草甸草原、典型草原、荒漠草原、高寒草原、温带草甸和高寒草甸6种主要植被类型的变化特征。

为进一步探究GPP的变化趋势,将北方草原GPP的变化按季节进行划分并进行MK检验。由图3可以看出,春季GPP在2001年发生突变,但突变点没有超过0.05显著性检验,所以突变点不显著,2010—2015年 UF 曲线大于0.05显著性水平,说明在此期间GPP下降趋势显著。夏季GPP在2003年

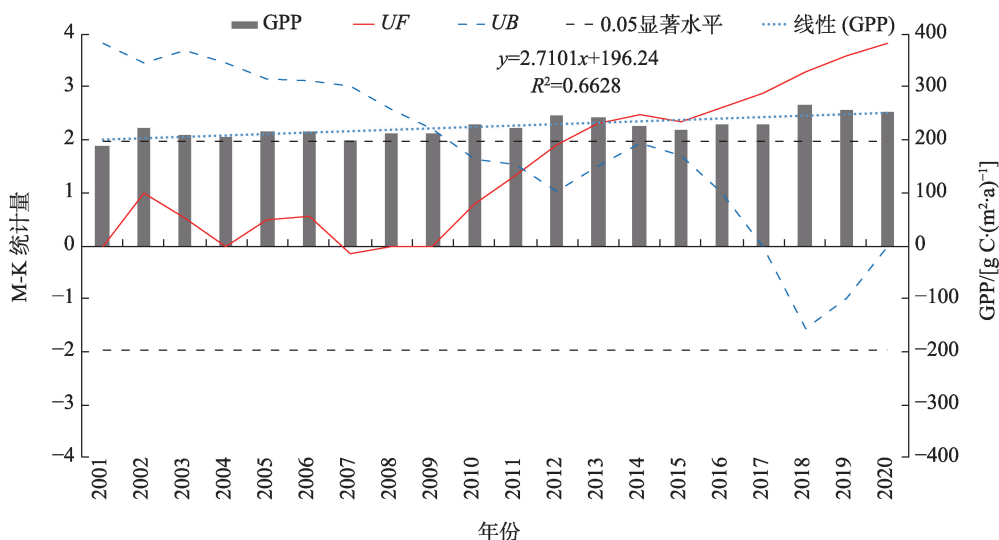


图2 2001—2020年北方草原GPP年际变化与突变结果

Fig. 2 Results of GPP interannual changes and mutations in northern grassland from 2001 to 2020

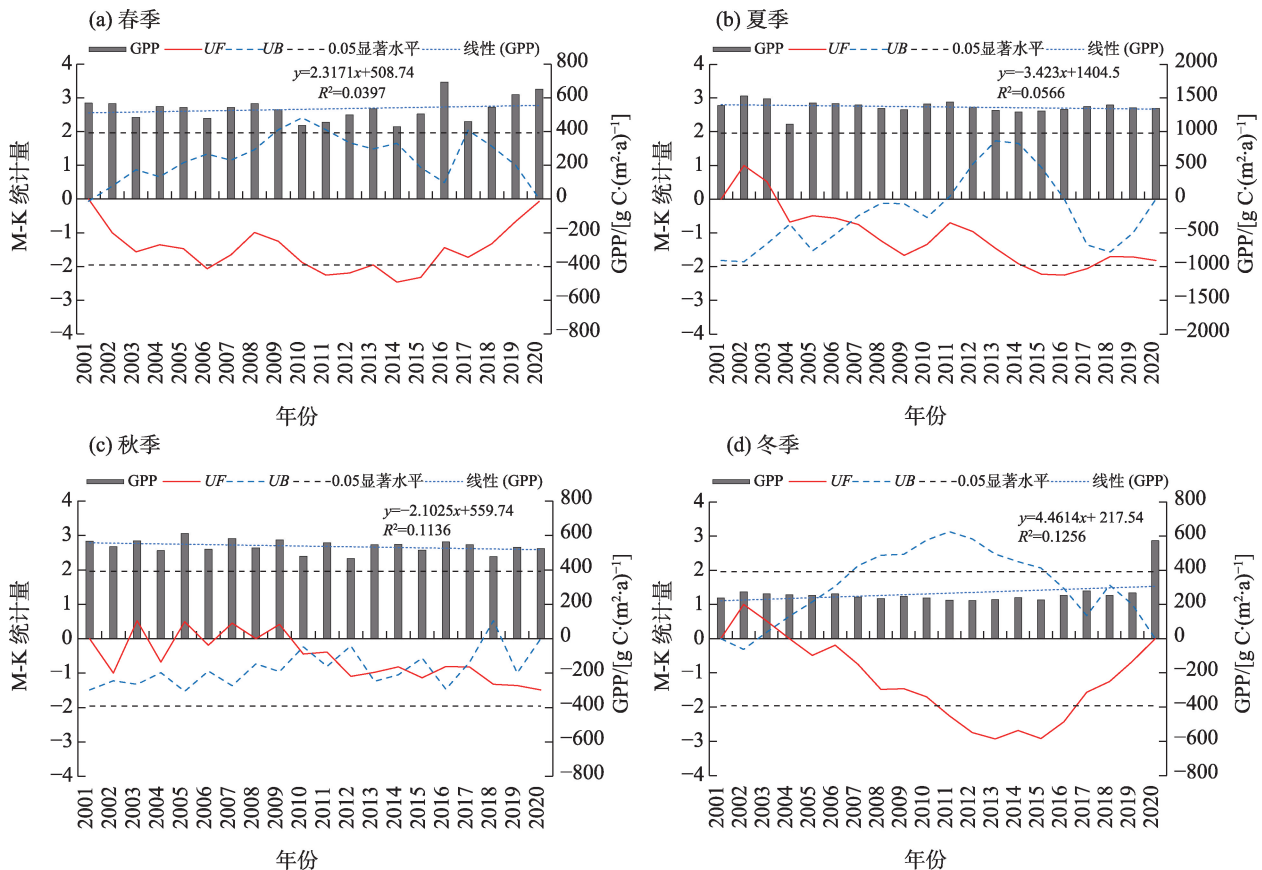


图3 2001—2020年北方草原平均GPP季节变化及M-K突变检验

Fig. 3 Seasonal variation of average GPP and M-K mutation test in northern grassland from 2001 to 2020

以后长期处于下降趋势,且在2014—2017年间超过0.05显著水平,下降趋势显著。秋季GPP波动较为频繁,且UF与UB曲线有7个交点,表明该时期GPP变化不稳定,但均未通过0.05置信水平的显著性检验,表明变化不显著。冬季GPP在2001—2004年间处于上升趋势,2004年以后一直处于下降趋势,在2010年通过0.05置信水平的显著性检验,此后下降趋势显著。

如图4所示,整体来看北方草原6种植被类型的GPP年际变化趋势基本一致,均呈上升波动趋势,GPP年均值变化呈现出:草甸草原>温带草甸>典型草原>高寒草甸>荒漠草原>高寒草原的特征。其中,草甸草原增长最快,年际变化最为明显,增长率为 $7.963 \text{ g C} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$,且一直处于高值状态;高寒草原年际变化不大,增长最慢,增长率为 $0.6485 \text{ g C} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$,表现较为稳定;其他4种植被类型的年际变化介于草甸草原和高寒草原之间,其中,温带草甸和典型草原的变化速率较为相似,增长率分别为 $5.2048 \text{ g C} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ 、 $5.0767 \text{ g C} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ 。

3.1.2 GPP空间分布特征 由图5可以看出,2001—2020年北方草原区年均GPP值变化在 $0 \sim 2228.83 \text{ g C} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$,年均值为 $230.34 \text{ g C} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$,总体呈现东北地区高、西南地区低的空间分布格局,在研究区6种草原类型中,GPP因草原类型不同而表现出显著的差异性。近20 a来,草甸草原的GPP平均值为 $660.44 \text{ g C} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$,属于各类型中的最高值;典型草原的GPP平均值为 $302.05 \text{ g C} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$,主要分布在内蒙古中东部一带;荒漠草原的GPP平均值为 $111.41 \text{ g C} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$,主要分布在新疆西北部、西藏西南部以及内蒙古中部地区;高寒草原的GPP平均值为 $33.39 \text{ g C} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$,主要分布于青藏高原大部分地区,是GPP在 $200 \text{ g C} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ 以下的主要类型区;温带草甸的GPP平均值为 $421.38 \text{ g C} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$;高寒草甸的GPP平均值为 $311.74 \text{ g C} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ 。

为了进一步反映中国北方草原GPP的变化特征,绘制了北方草原不同季节GPP空间变化图,从图6中可以看出,不同季节GPP的空间分布格局与多年GPP均值分布格局基本一致,都呈现东北地区

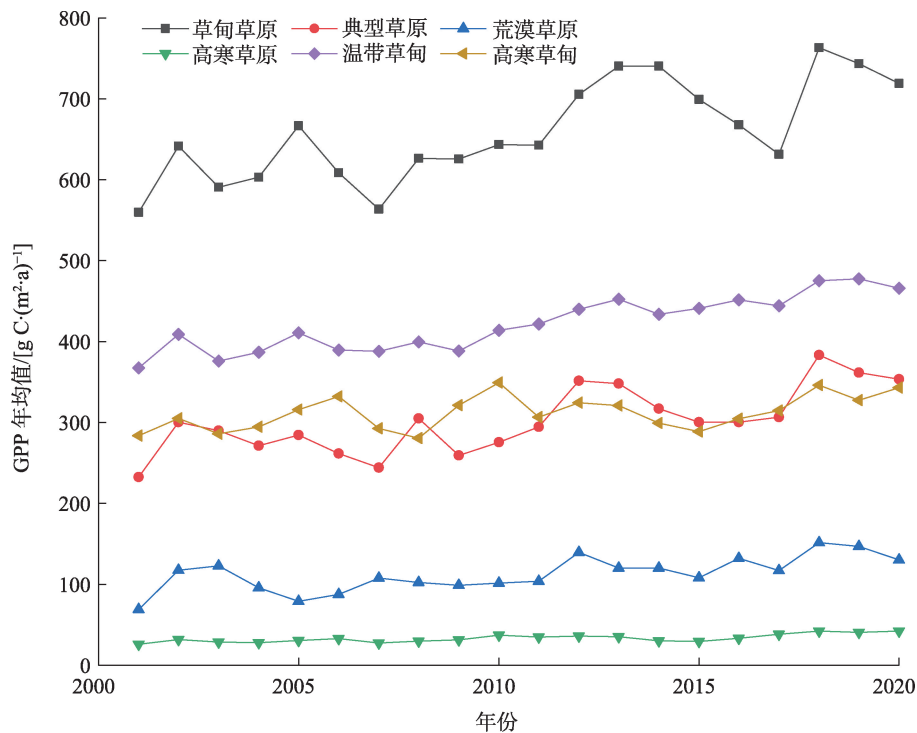


图4 不同草原类型GPP年际变化

Fig. 4 Annual variation of GPP in different vegetation types

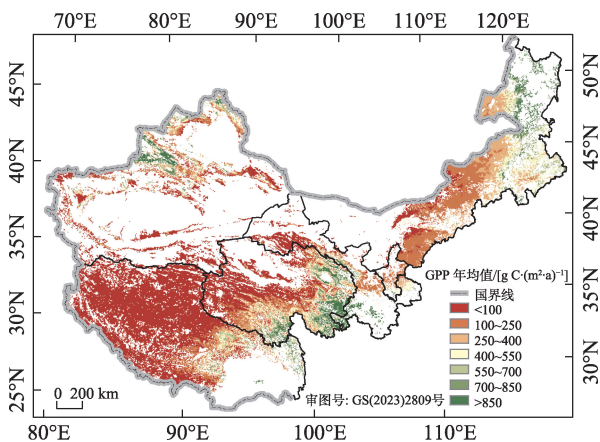


图5 2001—2020年北方草原区GPP均值空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of GPP mean in northern grassland from 2001 to 2020

高、西南地区低的格局,但受光照条件、季节性气候等诸多因素的影响,各个季节空间分布也呈现出一定的差异性。其中,春季GPP在 $0\sim 475.07\text{ g C}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{a})^{-1}$ 之间波动,平均值为 $17.73\text{ g C}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{a})^{-1}$;夏季GPP在 $0\sim 1285.33\text{ g C}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{a})^{-1}$ 之间波动,平均值为 $177.77\text{ g C}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{a})^{-1}$,由于夏季植被的光合作用最强,进而对应夏季的GPP值最高,所以对夏季的GPP空间分布格局和全年平均值分布格局一致性最高;秋季GPP在

$0\sim 536.84\text{ g C}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{a})^{-1}$ 之间波动,平均值为 $43.38\text{ g C}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{a})^{-1}$,秋季北部的高值区域消失,随着太阳高度角的下降,GPP高值逐渐向南移动,集中在青海南部地区,主要植被类型为高寒草甸;冬季GPP在 $0\sim 238.80\text{ g C}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{a})^{-1}$ 之间波动,平均值为 $7.03\text{ g C}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{a})^{-1}$,冬季气温较低,植被的光合作用为全年最弱,进而GPP值也达到了全年最低。

3.1.3 GPP变化趋势 为探究北方草原总初级生产力变化趋势,采用Sen趋势法对2001—2020年北方草原年际GPP逐像元进行了趋势分析,并通过趋势显著性检验。结果如图7a所示,年均趋势值在 $-38.37\sim 74.08$ 范围内波动,其中,呈现增加趋势占比最高,约占整个研究区面积的63.10%,整体扩散分布,主要分布在内蒙古大部分地区、西藏南部地区、新疆北部地区、青海中南部地区、宁夏大部分地区以及甘肃中部地区;基本不变的区域次之,约占全区的29.28%,主要分布在西藏西北部、青海和甘肃北部部分地区以及新疆南部地区;最后呈现减少趋势的范围占比最小,约占整个研究区的7.62%,其中不显著减少占比最高,约为6.08%,主要分布在西藏南部地区、新疆北部、青海中南部以及内蒙古中东部部分地区(图7b)。

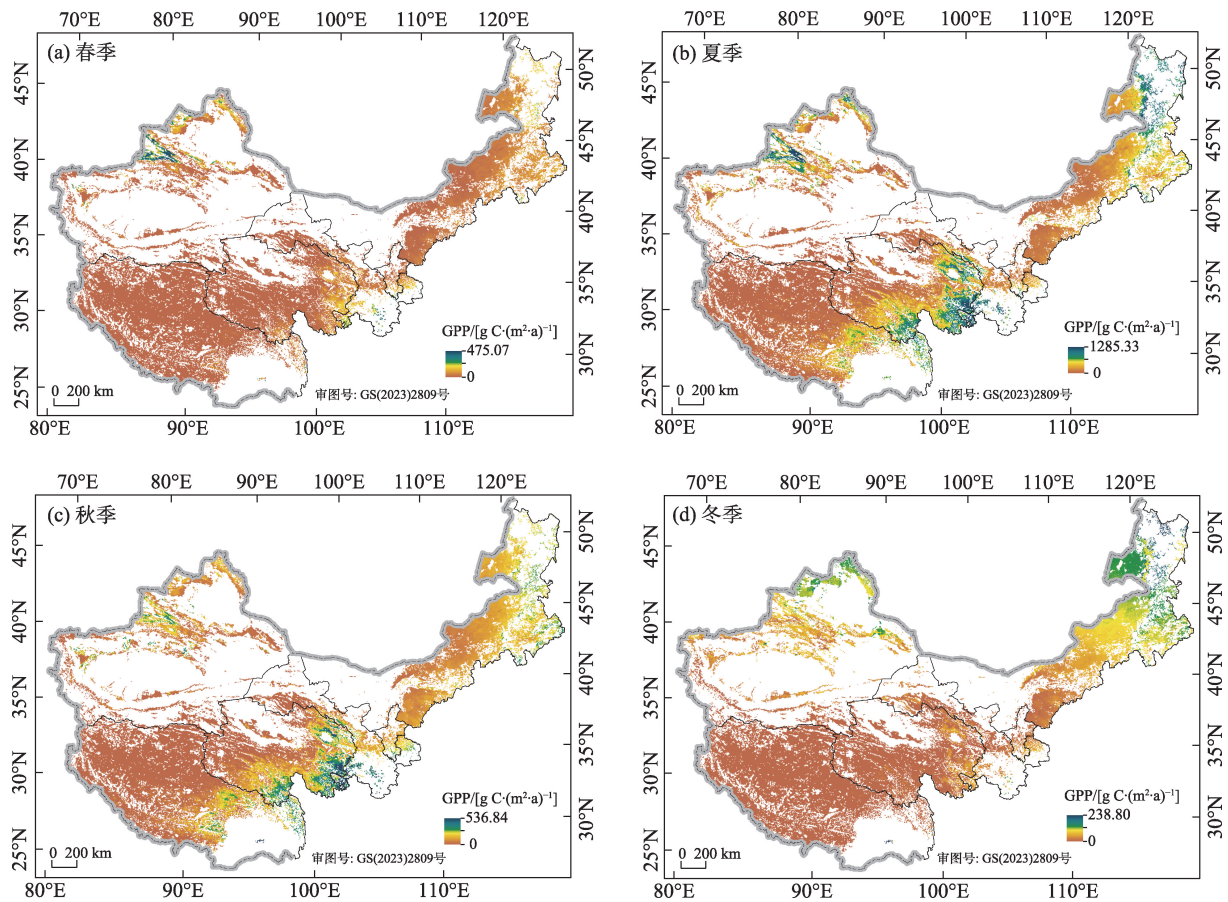


图6 2001—2020年北方草原区不同季节 GPP均值空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of GPP in different seasons in the northern steppe region from 2001 to 2020

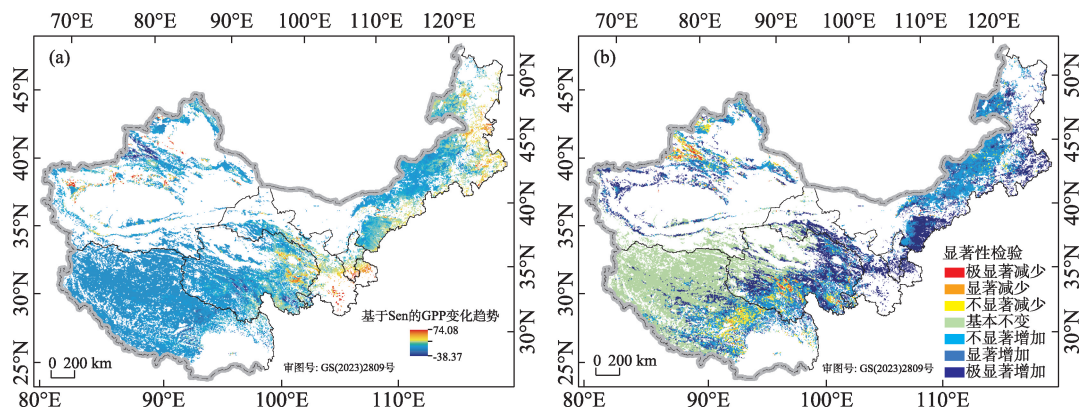


图7 2001—2020年北方草原GPP变化趋势与显著性检验

Fig. 7 GPP trend and significance test in northern steppe from 2001 to 2020

3.2 北方草原 SPEI 空间分布和时空变化特征

3.2.1 SPEI 时间分布特征 从图8可以看出,中国北方草原2001—2020年均SPEI以 $0.0049 \cdot a^{-1}$ 速率缓慢上升,且上升趋势微弱。研究区呈现干旱和湿润交替出现的现象,总体来看,大多数情况下为湿润期。2003年和2006年分别为最湿润和干旱年,其中,2003年SPEI值为0.84,2006年SPEI值为-0.98,

属于轻微干旱;在2001—2020年间, UB 的统计量基本都大于0,这表明研究期内,SPEI呈上升趋势,且干旱情况不严重, UF 与 UB 曲线分别在2001年、2005年和2017年都有变异点,但都未通过0.05水平的显著性检验,表明变化不显著,其中2017年为北方草原湿润化突变的开始。

图9中北方草原2001—2020年春季平均SPEI

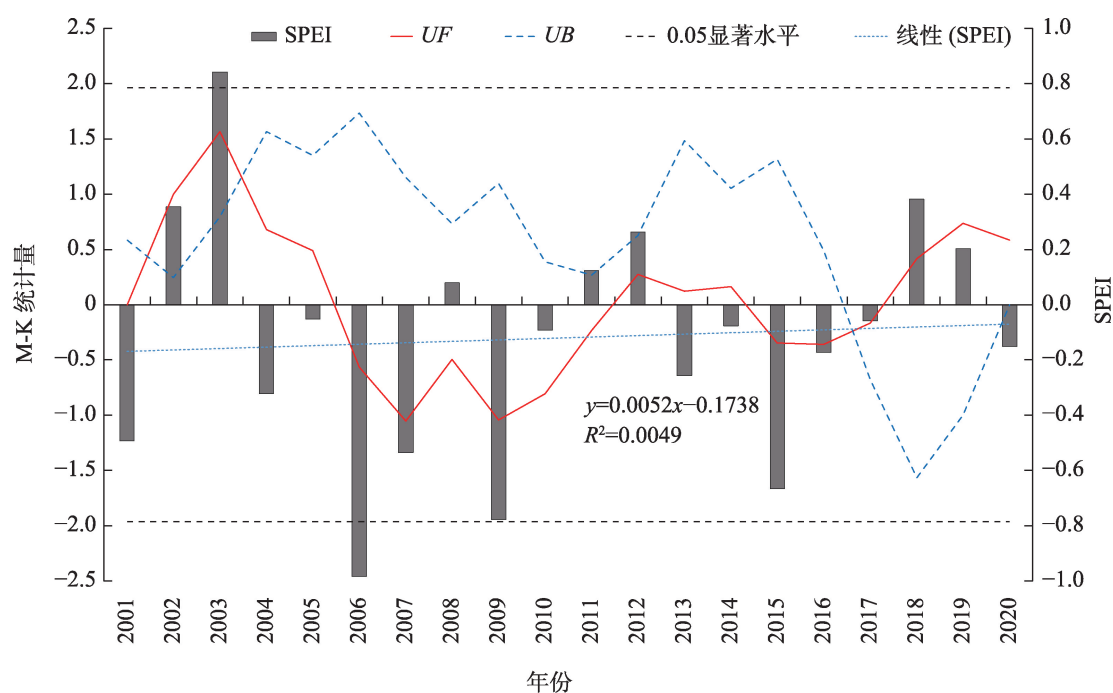


图8 2001—2020年北方草原SPEI年际变化与突变结果

Fig. 8 Interannual variation and mutation of SPEI in the northern steppe from 2001 to 2020

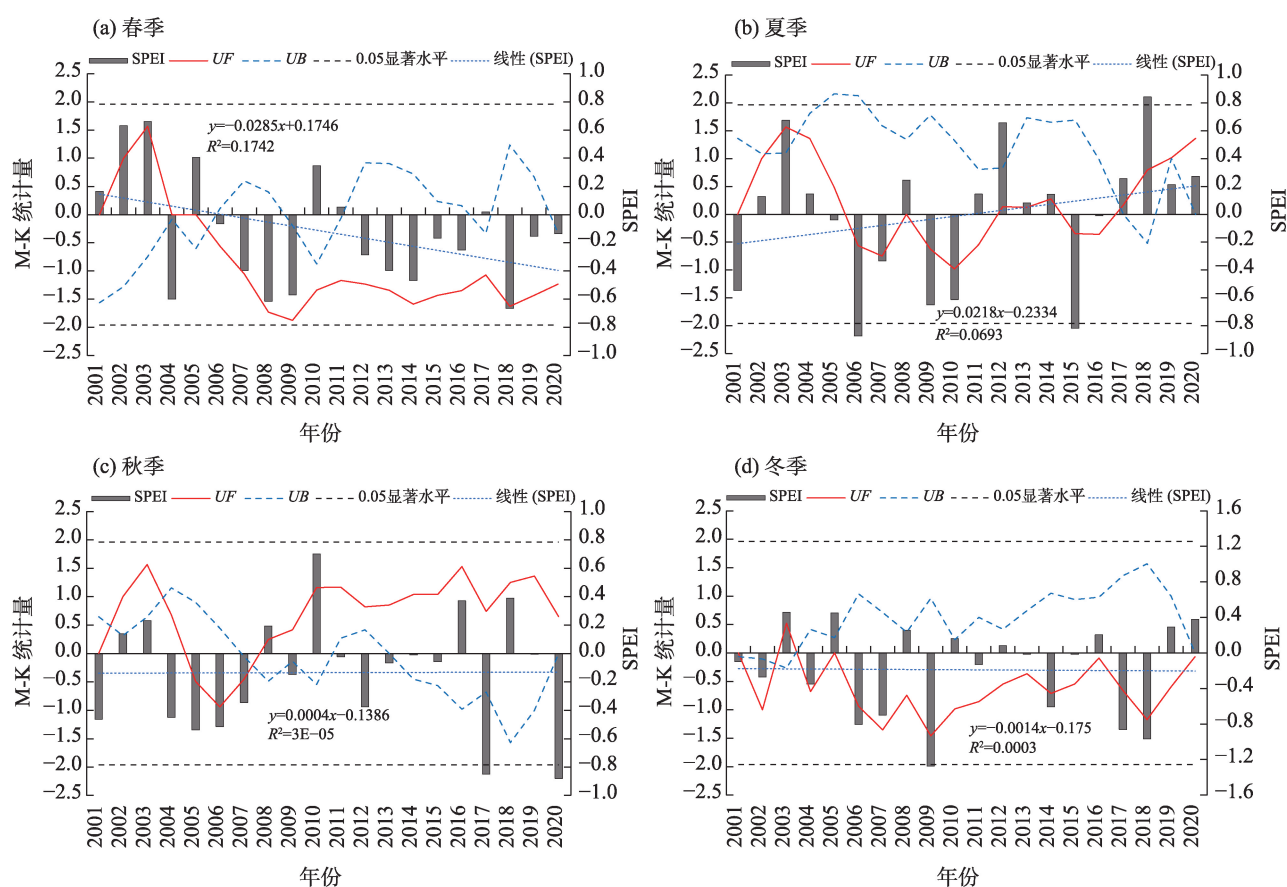


图9 2001—2020年北方草原平均SPEI季节变化及M-K突变检验

Fig. 9 Seasonal variation of average SPEI and M-K mutation test in northern grassland from 2001 to 2020

以 $0.285 \cdot (10a)^{-1}$ 的速率下降,呈现干旱化趋势,2003年和2008年分别为最湿润和干旱年,其中,2003年SPEI值为0.66,2008年SPEI值为-0.62,属于轻微干旱。 UF 与 UB 曲线分别在2004年、2005年有交点,但都未通过0.05水平的显著性检验,表明突变点对应时期变化不显著。夏季北方草原平均SPEI以 $0.218 \cdot (10a)^{-1}$ 的速率上升,2006年和2018年分别为最干旱和湿润年,其中,2006年SPEI值为-0.87,2018年SPEI值为0.84, UF 和 UB 曲线出现4次相交,其中,2012—2016年有3次交点,表明该时期干旱状态不稳定,但都未通过0.05水平的显著性检验,所以干旱变化不显著。秋季北方草原平均SPEI以 $0.004 \cdot (10a)^{-1}$ 的速率上升, UF 和 UB 曲线在2008年之后无交点,表明秋季干旱突变主要集中在2001—2008年间,在2008年之后干旱并无明显变化。冬季北方草原平均SPEI以 $0.014 \cdot (10a)^{-1}$ 的速率下降,其中,2003年和2009年分别为最湿润和干旱年,SPEI值分别为0.46、-1.27,属于中度干旱, UF 曲线从2004年开始小于0,表明冬季SPEI呈下降趋势。 UF 和 UB 曲线有3个交点且都在临界值内,说明干旱发生了3次突变,但变化效果不显著。

3.2.2 SPEI空间分布特征 由图10可以看出,20 a间,北方草原的SPEI均值在-1.41~0.87间波动,平均值为-0.12,属于正常范围。整体呈现东北地区低,西南地区高的空间分布特征。高值区出现在西藏和青海的大部分地区,主要植被类型为高寒草甸和高寒草原;低值区主要集中在内蒙古大部分地区

以及新疆中部地区,主要植被类型为荒漠草原、典型草原以及温带草甸。温带草甸的SPEI平均值为-0.48,荒漠草原的SPEI平均值为-0.53,高寒草原的SPEI平均值为0.08,高寒草甸的SPEI平均值为0.39,典型草原的SPEI平均值为-0.58,草甸草原的SPEI平均值为-0.54。

从图11可以看出,春季、夏季、秋季SPEI的空间分布格局与多年SPEI均值分布格局基本一致,均呈现东北高、西南低的格局,而冬季SPEI空间分布格局则呈现西南低、东北高的格局,春季SPEI均值在-1.31~1.02间波动,平均值为-0.13;夏季SPEI均值在-1.20~0.99间波动,平均值为-0.004;秋季SPEI均值在-1.13~0.78间波动,平均值为-0.13;冬季SPEI均值在-1.11~0.99间波动,平均值为-0.19,冬季高值区主要出现在西藏北部地区、青海东北部地区、内蒙古东北部地区,主要植被类型为典型草原和高寒草甸。

3.2.3 SPEI变化趋势 为探究北方草原SPEI变化趋势,采用Sen趋势法对2001—2020年北方草原年际SPEI逐像元进行了趋势分析,并通过趋势显著性检验。结果如图12所示,年均趋势值在-0.12~0.15范围内波动,整体呈现扩散分布,变化趋势呈现东北地区高,西南地区低的特征,其中,呈现增加趋势占比较高,约占整个研究区面积的58.05%,其中,内蒙古东北部地区和青海南部地区变化趋势较大;极显著增加占比最小为0.08%,研究区内大部分SPEI的变化趋势不显著。呈现减少趋势的占比为41.95%,其中,西藏和新疆北部地区变化趋势整体较低,不显著减少的占比最高为40.32%,主要分布在新疆北部地区,西藏大部分地区,青海西南部地区以及内蒙古西南地区。

3.3 干旱对北方草原GPP的累积效应

基于GPP与累积SPEI的相关性分析,利用相关系数最大的累积时间($r_{\max-cum}$)生成SPEI对草原GPP的累积效应。总体而言,北方草原面积的绝大部分(84.99%)以正相关为主,发生了累积效应。只有新疆北部、西藏西部以及内蒙古东北部部分地区呈现负相关(图13a)。 $r_{\max-cum}$ 的平均值为0.16,在新疆东北部地区发现了高相关性地区($r_{\max-cum} > 0.5$),其相关性为0.51。

干旱对GPP的最长累积时间尺度主要集中在3~4个月(图13b),覆盖北方草原面积的39.82%。

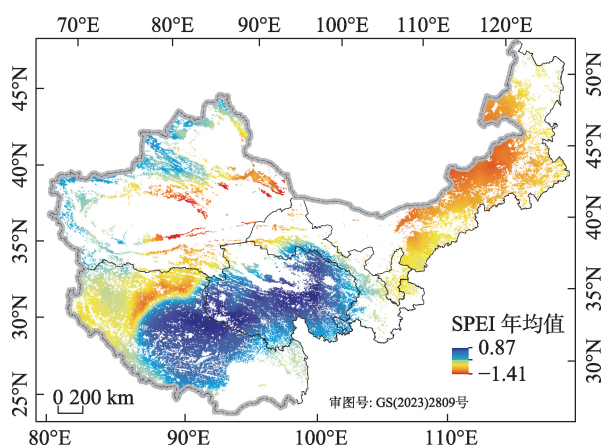


图10 2001—2020年北方草原区SPEI均值空间分布

Fig. 10 Spatial distribution of SPEI mean in northern steppe from 2001 to 2020

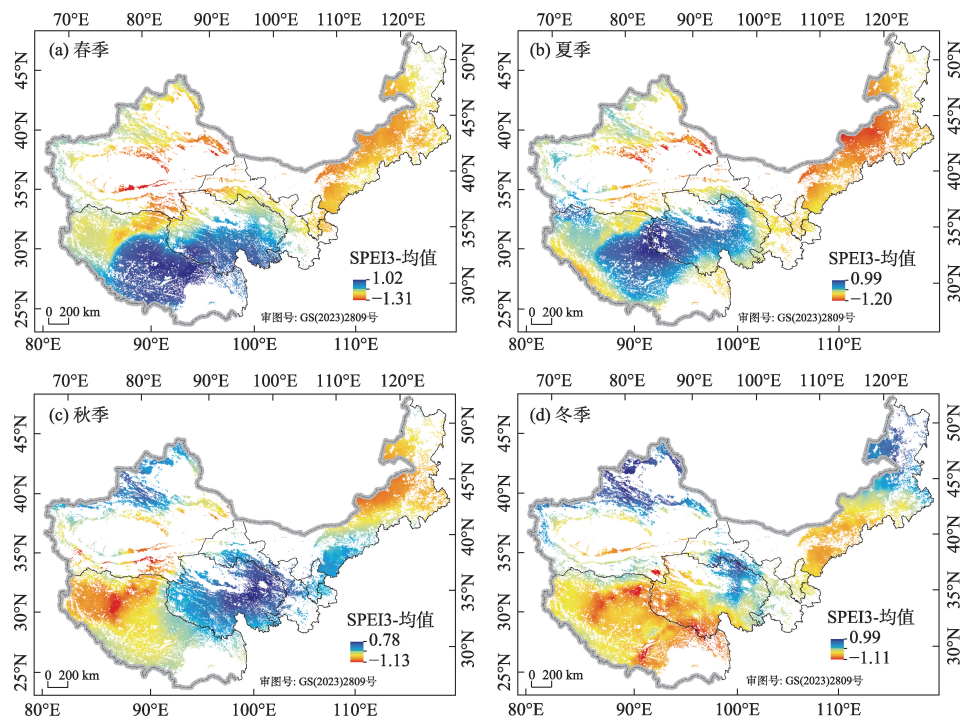


图 11 2001—2020 年北方草原区不同季节 SPEI 均值空间分布

Fig. 11 Spatial distribution of mean SPEI in different seasons in northern steppe region from 2001 to 2020

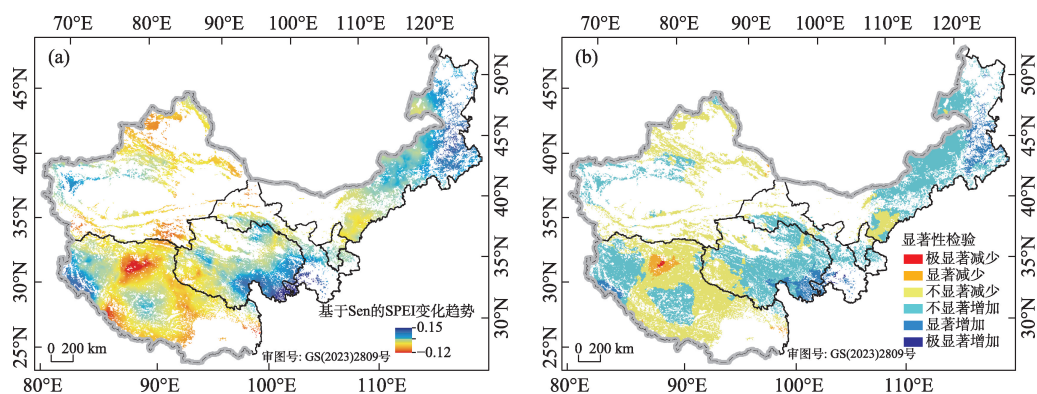


图 12 2001—2020 年北方草原 SPEI 变化趋势与显著性检验

Fig. 12 SPEI trend and significance test in northern steppe from 2001 to 2020

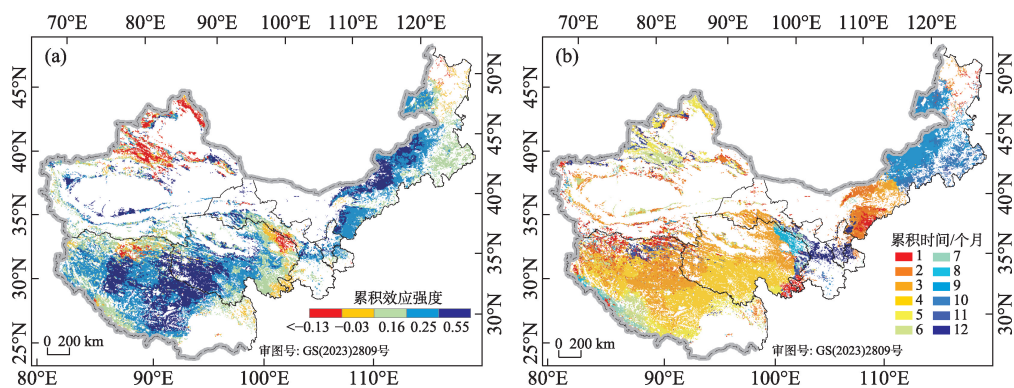


图 13 干旱对植被 GPP 的累积效应强度与累积时间的空间分布

Fig. 13 Spatial distribution of cumulative effect intensity and cumulative time of drought on vegetation GPP

面积百分比峰值出现在4个月的时间尺度,占20.27%,表明GPP通常对短期干旱有响应,主要分布在西藏东北部,青海东南部以及内蒙古中部地区。其次是3个月(19.55%)和9个月(11.02%)。此外,8个月的时间尺度所占比例最小,占比为2.22%,主要分布在西藏的西部地区,以及青海东北部地区。

$r_{\max-\text{cum}}$ 的面积百分比和平均值(图14)在不同的累积时间时,会有明显的差异性。由图14a可以看出,面积百分比峰值出现在 $r_{\max-\text{cum}}$ 为0~0.05,所占比例为40.99%,累积时间尺度为12个月。其次是11个月和10个月,所占比例分别为35.43%和32.45%。整体来看,累积4个月时相关性最强。图14b展示了平均正相关系数随累积时间变化情况,从1个月到4个月,相关性逐渐增强,在4个月时达到峰值, $r_{\max-\text{cum}}$ 为0.17,4个月以后相关性开始下

降,12个月时, $r_{\max-\text{cum}}$ 出现最小值为0.08。

水平衡梯度与平均累积相关系数($r_{\max-\text{cum}}$)和平均累积时间的关系如图15所示,年平均SPEI与累积相关系数呈显著正相关关系($R^2=0.879$),随着干旱情况减轻,平均正累积系数($r_{\max-\text{cum}}$)先下降后上升,表明在半干旱或半湿润地区,干旱对草原GPP的累积效应最强;而在相对干旱或湿润地区,干旱对草原GPP累积效应相对较弱(图15a)。平均累积时间与年平均SPEI呈负相关,表明水分供应越充足(即年平均SPEI值升高),干旱对植被GPP的累积作用响应时间越短(图15b)。

3.4 干旱对北方草原GPP的时滞效应

基于GPP与累积SPEI的相关性分析,利用相关系数最大的滞后时间($r_{\max-\text{lag}}$)生成SPEI对草原GPP的时滞效应。总体而言,干旱对北方草原面积的63.11%有时滞效应,只有青海部分地区呈现负相

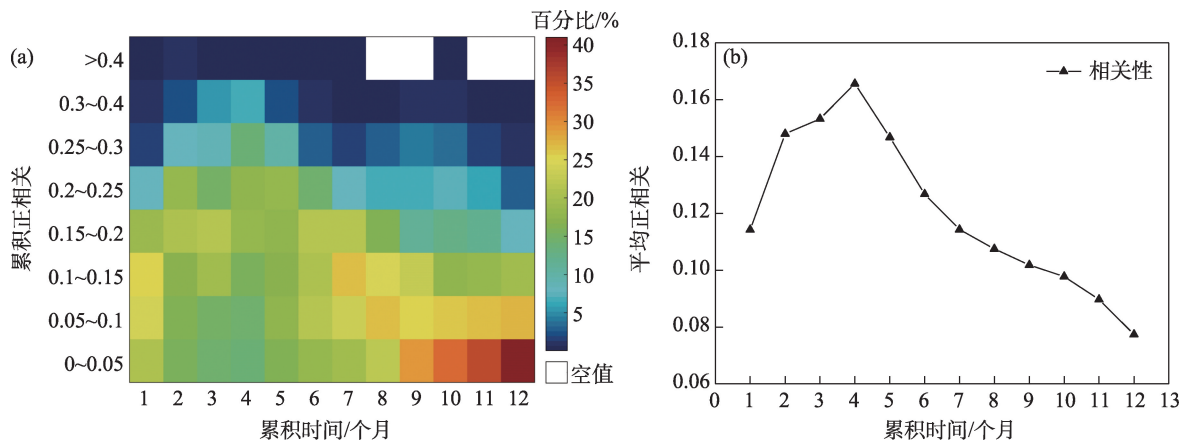


图14 累积效应的正相关变化

Fig. 14 Positive correlation of cumulative effects

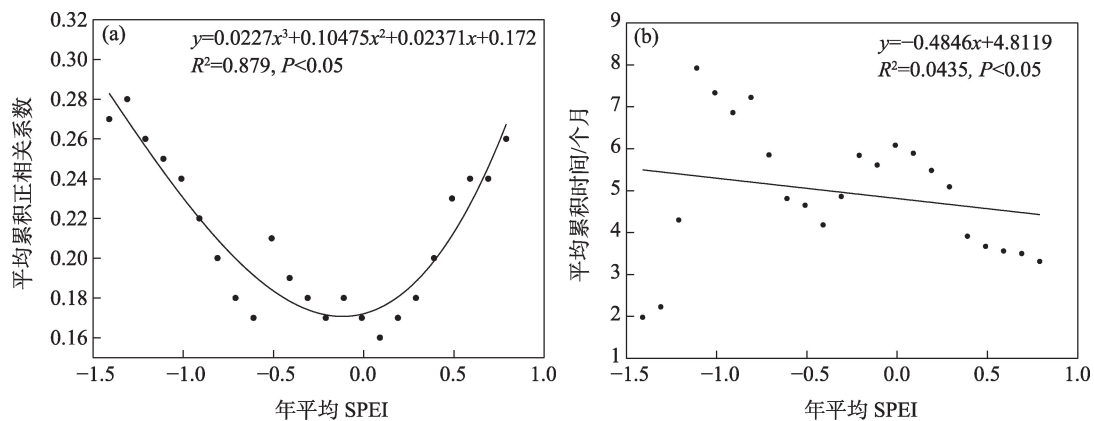


图15 年平均SPEI与累积效应的关系

Fig. 15 Relationship between annual average SPEI and cumulative effects

关(图 16a)。 $r_{\max-\text{lag}}$ 的平均值为 0.20, 在新疆东北部地区发现了高相关性地区, 其相关性为 0.42。

在具有时滞响应的区域中, 最长滞后时间尺度主要集中在 7 个月(图 16b), 覆盖北方草原的 41.59%, 集中分布在西藏、青海、新疆以及内蒙古中部和东北部地区, 表明该地区的植被类型受干旱滞后的影响尤为明显。滞后 7 个月的时候, 干旱对 GPP 的响应最大, 占比为 19.73%, 主要分布在西藏中南部地区, 青海西南部地区、新疆北部地区以及内蒙古东北部地区。其次是 1 个月尺度, 面积占比为 13.81%, 主要分布在西藏北部地区, 内蒙古中部地区以及青海中部地区。此外, 2 个月尺度的滞后占比也很高, 约占 11.39%, 主要分布在西藏中部地区以及青海南部地区。这 3 个滞后尺度在北方草原中分布最为广泛。此外, 面积占比最小的 10~11 个

月, 占比约为 4.14%, 主要分布在新疆南部地区、西北部地区、青海、甘肃和宁夏少部分地区。

由图 17a 可知, $r_{\max-\text{lag}}$ 的面积百分比和平均值也在不同的滞后时间时, 表现出明显的差异性。其中, 滞后 7 个月和 12 个月相关性最高。面积峰值出现在滞后 9 个月 $r_{\max-\text{lag}}$ 为 0.05~0.1 时, 其占比为 38.79%, 其次是滞后 11 个月时 $r_{\max-\text{lag}}$ 为 0~0.05 时, 面积占比为 36.22%。其中, 滞后相关系数大部分都 < 0.4 , 大部分较弱。此外, 平均相关系数随滞后时间尺度的变化而上下波动, 较为不稳定, 其中, 滞后 7 个月时平均正相关系数最大($r=0.14$), 滞后 5 个月平均正相关系数最小(0.06)。GPP 和 SPEI 之间的平均相关系数在滞后时间尺度上变化较为明显(图 17b)。

水平衡梯度与平均滞后相关系数($r_{\max-\text{lag}}$)和平

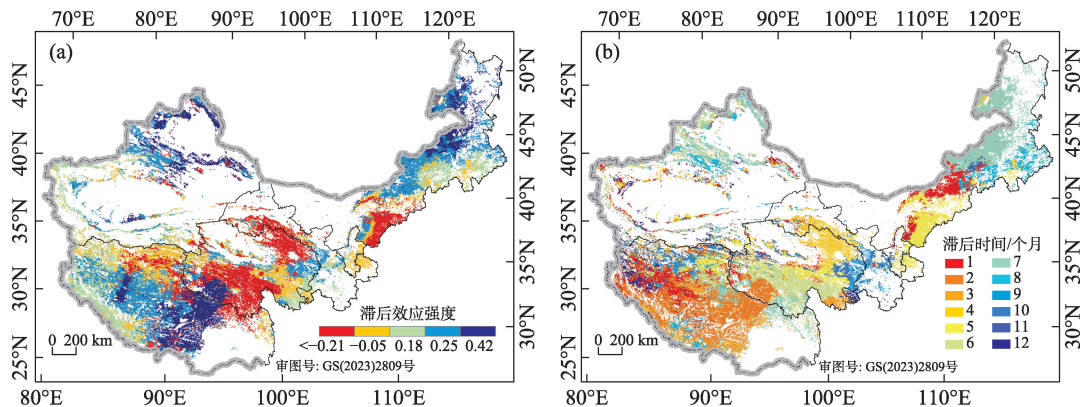


图 16 干旱对植被 GPP 的滞后效应强度与滞后时间的空间分布

Fig. 16 Spatial distribution of lag effect intensity and lag time of drought on vegetation GPP

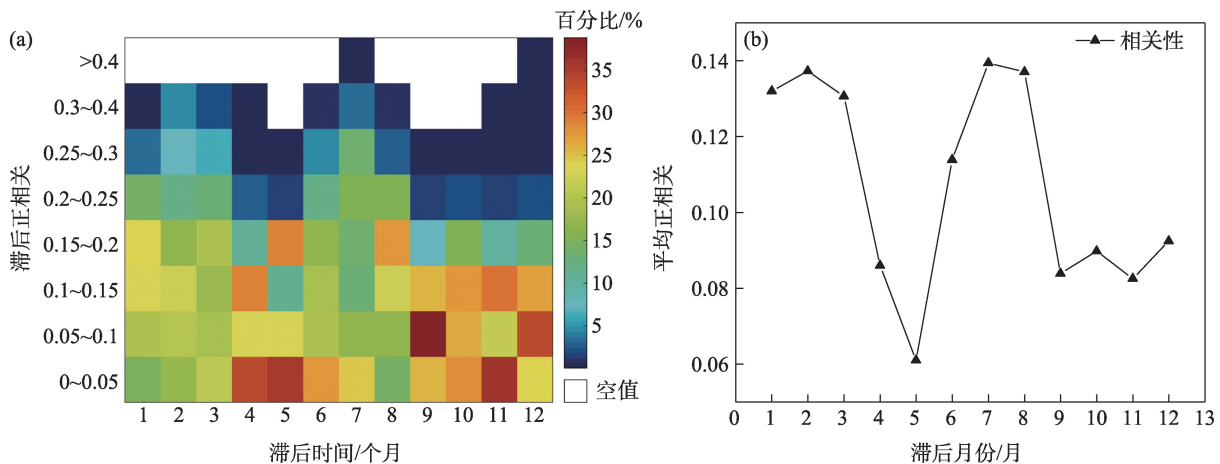


图 17 滞后效应的正相关变化

Fig. 17 Positive correlation change of lag effects

均滞后时间的关系如图 18 所示,年平均 SPEI 与累积相关系数呈显著负相关关系($R^2=0.78$),随着年平均 SPEI 不断增大,平均正滞后系数($r_{\max-lag}$)先下降后上升,表明在干旱或湿润地区,干旱对草原 GPP 的滞后效应最强;而在半干旱或半湿润地区,干旱对草原 GPP 累积效应相对较弱(图 18a)。平均滞后时间与年平均 SPEI 呈负相关,随着水分平衡条件的改善,平均滞后时间从 11.07 个月下降到 2.15 个月,表明随着干旱趋势加重,干旱对植被 GPP 的滞后作用响应时间越长(图 18b)。

3.5 干旱对不同类型下草原 GPP 的时滞和累积效应

如图 19 所示,进一步探究了不同草原类型下的时滞和累积效应。结果表明,不同草原类型的 GPP 与干旱的相关性水平差异很大。大部分草原类型都表现为累积效应强于时滞效应,只有草甸草原和

温带草甸的时滞效应大于累积效应。草甸草原的时滞效应最强为 0.19,荒漠草原的累积效应最强为 0.21。所有草原类型的累积时间都大于 4 个月,其中,草甸草原累积时间和滞后时间都最长,约为 8 个月和 6 个月。

4 讨论

GPP 对干旱的响应结束后,仍然会对生态系统的碳汇量产生影响,同时也会导致植被对干旱产生的记忆效应而使其响应混乱,进而导致 GPP 在长时间内产生多个响应状态,即滞后效应和累积效应^[35-36]。本文根据 Pearson 相关分析法对北方草原区的 SPEI 和 GPP 之间的关系进行探究,结果表明,干旱对北方大多数草原都有滞后作用,并且最长滞后时间是 7 个月,占比为 19.73%,表明生长季的土壤水分条件对植被的生长有影响,会产生一定的时滞效应^[20],且

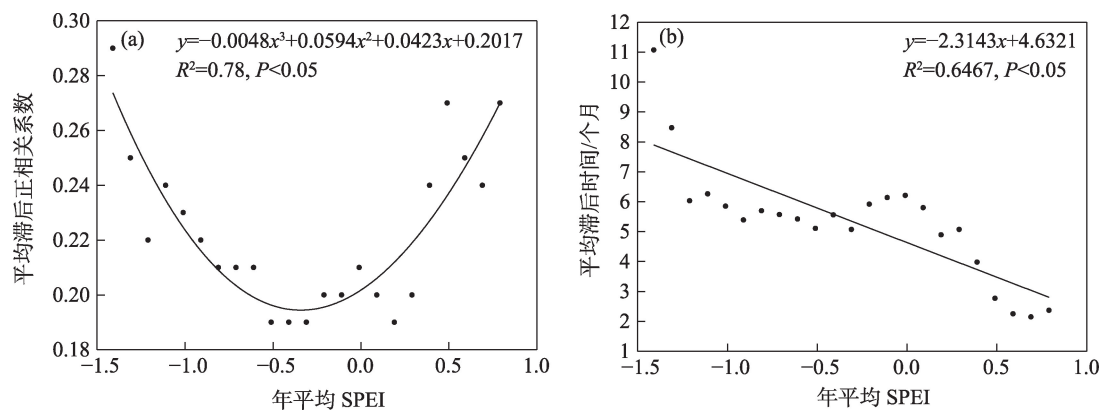


图 18 年平均 SPEI 与滞后效应的关系

Fig. 18 Relationship between annual average SPEI and lag effects

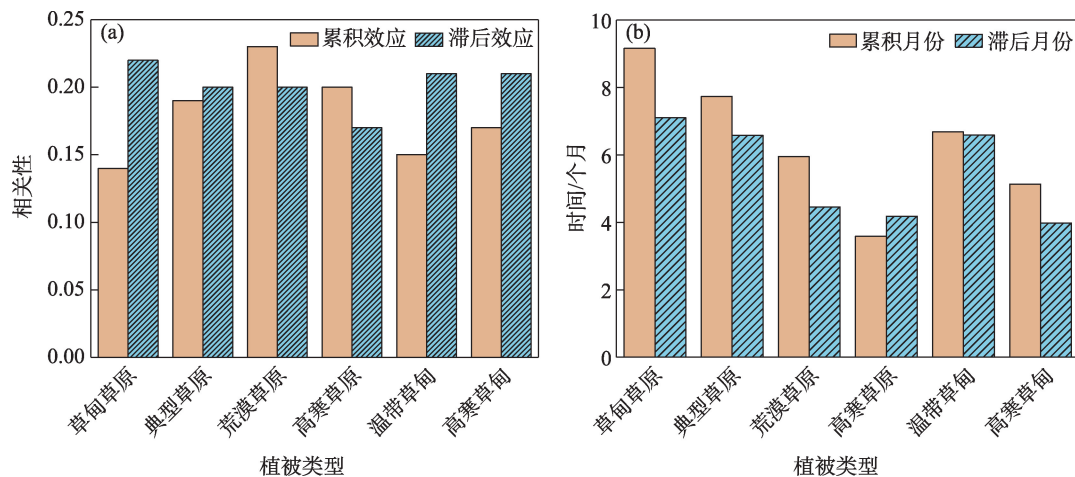


图 19 不同植被类型的滞后效应和累积效应

Fig. 19 Lag effect and cumulative effect of different vegetation types

分布在内蒙古北部和新疆北部地区的主要植被类型为典型草原,导致这一现象的原因是这些地区纬度偏北,气候较冷,被冰雪覆盖,导致土壤中的水分被冻结,这与Wei等^[34]研究一致。高寒草甸主要分布在青藏高原的东北部,常年冰雪覆盖,主要植被类型为多年生草本植物,GPP在一定程度上可以抵抗短期干旱,因为高寒草甸可以利用草毡层以下的深层土壤水分^[37],因此该地区的滞后效应存在负相关。

与滞后效应相似,北方草原大部分地区(84.99%)对干旱具有累积效应,这意味着干旱能够抑制草原的生产力。在新疆东北部地区发现了高相关性地区(相关性为0.51),主要植被类型为荒漠草原,主要原因是荒漠草原是草原向荒漠过渡的旱生性最强的草原生态系统^[38],是草原植被中最干旱的一类草原,年降水量 ≤ 200 mm,更容易受到干旱的影响,所以相关性较高。干旱对GPP的最长累积时间尺度主要集中在3~4个月,SPEI与GPP的相关性最高,这与干旱的程度和持续时间有关,这与杜文丽等^[6]、徐清宸等^[39]研究得出的干旱对植被GPP响应的结果相吻合。同时,已有相关研究证明,SPEI-3能够较好地捕捉土壤水分状态的短期变化特性^[40]。本研究将不同草原类型下与干旱累积效应和时滞效应相比,发现累积效应中:荒漠草原>高寒草原>典型草原>高寒草甸>草甸草原>温带草甸,这一结果与徐清宸等^[39]研究得出的GPP与SPEI的相关性:荒漠草原>典型草原>草甸草原的结果相一致。且从不同植被类型来看,干旱对北方草原大部分地区的主导效应为累积效应。但不同草原的累积时间一般要强于滞后时间。

通过对不同水分下干旱对草原GPP的累积和滞后效应的影响,笔者发现不同水分条件与干旱的累积效应之间呈现正相关,这与顾锡羚等^[19]研究一致,但与Zhao等^[32]、Wei^[34]等研究不一致,造成其主要原因可能是北方草原区植被类型较多,且不同的草原植被对水分流失、呼吸耗竭和光合作用等生理特征和功能策略已经发生演变,例如在受到干旱胁迫时,仍能保持一定的气孔导度来维持光合作用,这就使其抗旱性发生变化,能够快速响应水资源的变化^[41],也有研究表明,不同的植被类型对环境的

响应也是不同的^[42],因此,累积效应呈现出正相关。此外,在不同水分条件下,干旱的滞后效应与其呈负相关关系,表明干旱地区的植被相比其他地区,更容易受到干旱胁迫。且通过对比发现,在北方草原区干旱对GPP的累积效应强于时滞效应。

中国北方草原地理位置较为独特,且该地区的水热条件导致其生态系统变得脆弱,尤其是青藏高原地区植被对气候变化极其敏感^[43]。其中,草甸草原水分条件最易受干旱的影响,所以在干旱严重时,GPP和SPEI之间的相关性就越高。因此,在今后的工作中,更应该注重北方草原土壤水分的保持和恢复(例如增加黏土含量),其中,草甸草原的干旱治理工作尤为重要,并且要注意干旱的累积和滞后效应给植被带来的影响,尤其是干旱的累积效应,应提前采取相应的措施来保护草原植被的生长。

5 结 论

在本研究中,利用植被总初级生产力GPP和干旱数据SPEI,通过对2001—2020年期间干旱对北方草原GPP的滞后和累积效应进行了研究,主要研究结论如下:

(1) 北方草原多年平均GPP呈现东北高、西南低的空间分布格局,多年平均SPEI呈现东北低、西南高的空间分布格局,研究区呈现干旱和湿润交替出现的现象,且SPEI和GPP的年平均值都随时间变化呈现上升趋势。GPP年均值呈现出:草甸草原>温带草原>典型草原>高寒草甸>荒漠草原>高寒草原的特征。

(2) 干旱对北方草原面积的63.89%有滞后效应,主要发生在7个月,占比为19.7%,且随着干旱情况的加剧,干旱的滞后效应程度增加。

(3) 干旱对北方草原面积的84.98%产生累积效应,最长累积时间尺度主要集中在3~4个月,覆盖北方草原面积的39.81%,同时干旱地区的累积效应强于半干旱地区和湿润地区。

(4) 不同草地类型对SPEI的响应有所差异,干旱对草原GPP的滞后效应呈现出:草甸草原>荒漠草原>温带草甸>典型草原>高寒草原>高寒草甸的特点;而干旱对草原GPP的累积效应呈现出:

草甸草原 > 温带草甸 > 典型草原 > 高寒草甸 > 荒漠草原 > 高寒草原的特点。

参考文献(References):

- [1] Pan S, Tian H, Danggal S R S, et al. Impacts of climate variability and extremes on global net primary production in the first decade of the 21st century[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2015, 25: 1027–1044.
- [2] 王莺, 王健顺, 张强. 中国草原干旱灾害风险特征研究[J]. *草业学报*, 2022, 31(8): 1–12. [Wang Ying, Wang Jianshun, Zhang Qiang. Drought risk status of grassland in China[J]. *Acta Pratacul-turae Sinica*, 2022, 31(8): 1–12.]
- [3] 李稚, 李玉朋, 李鸿威, 等. 中亚地区干旱变化及其影响分析[J]. *地球科学进展*, 2022, 37(1): 37–50. [Li Zhi, Li Yupeng, Li Hong-wei, et al. Analysis of drought change and its impact in Central Asia[J]. *Advances in Earth Science*, 2022, 37(1): 37–50.]
- [4] 袁文平, 蔡文文, 刘丹, 等. 陆地生态系统植被生产力遥感模型研究进展[J]. *地球科学进展*, 2014, 29(5): 541–550. [Yuan Wen-ping, Cai Wenwen, Liu Dan, et al. Satellite-based vegetation pro-duction models of terrestrial ecosystem: An overview[J]. *Advances in Earth Science*, 2014, 29(5): 541–550.]
- [5] 吕锦心, 梁康, 刘昌明, 等. 无定河流域土地覆被空间分异机制及相关水碳变量变化[J]. *干旱区研究*, 2023, 40(4): 563–572. [Lv Jinxin, Liang Kang, Liu Changming, et al. Spatial differentia-tion mechanism of land cover and related changes in water-carbon variables in Wuding River Basin[J]. *Arid Zone Research*, 2023, 40(4): 563–572.]
- [6] 杜文丽, 孙少波, 吴云涛, 等. 1980—2013年中国陆地生态系统总初级生产力对干旱的响应特征[J]. *生态学杂志*, 2020, 39(1): 23–35. [Du Wenli, Sun Shaobo, Wu Yuntao, et al. The responses of gross primary production to drought in terrestrial ecosystems of China during 1980–2013[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2020, 39(1): 23–35.]
- [7] Vicente-Serrano S M, Gouveia C, Camarero J J, et al. Response of vegetation to drought time-scales across global land biomes[J]. *Pro-ceedings of the National Academy of Sciences*, 2013, 110(1): 52–57.
- [8] Zhao X, Xia H, Liu B, et al. Spatiotemporal comparison of drought in Shaanxi- Gansu- Ningxia from 2003 to 2020 using various drought indices in google earth engine[J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(7): 1570.
- [9] 朱光磊. 嫩江流域植被动态变化及其对气象干旱的响应研究[D]. 延边: 延边大学, 2021. [Zhu Guanglei. Study on Dynamic Change of Vegetation and Its Response to Meteorological Drought in Nenjiang River Basin[D]. Yanbian: Yanbian University, 2021.]
- [10] Tong S, Bao Y, Te R, et al. Analysis of drought characteristics in Xilingol grassland of Northern China based on SPEI and its im-pact on vegetation[J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2017, 2017: 1–11.
- [11] Zhang Z, Ju W, Zhou Y, et al. Revisiting the cumulative effects of drought on global gross primary productivity based on new long-term series data (1982–2018)[J]. *Global Change Biology*, 2022, 28(11): 3620–3635.
- [12] Frank D, Reichstein M, Bahn M, et al. Effects of climate extremes on the terrestrial carbon cycle: Concepts, processes and potential future impacts[J]. *Global Change Biology*, 2015, 21(8): 2861–2880.
- [13] 逮金鑫. 黄土高原植被恢复成效评估与气候变化及干旱的时滞效应[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2022. [Lu Jinxin. Evaluation of Vegetation Restoration in Loess Plateau and Time-lag Effect of Climate Change and Drought[D]. Yangling: North West Agricul-ture and Forestry University, 2022.]
- [14] Kolus H R, Huntzinger D N, Schwalm C R, et al. Land carbon models underestimate the severity and duration of drought's im-pact on plant productivity[J]. *Scientific Reports*, 2019, 9(1): 2758.
- [15] Peng J, Wu C, Zhang X, et al. Satellite detection of cumulative and lagged effects of drought on autumn leaf senescence over the Northern Hemisphere[J]. *Global Change Biology*, 2019, 25(6): 2174–2188.
- [16] Braswell B H, Schimel D S, Linder E, et al. The response of global terrestrial ecosystems to interannual temperature variability[J]. *Sci-ence*, 1997, 278(5339): 870–873..
- [17] Zuo D, Han Y, Xu Z, et al. Time-lag effects of climatic change and drought on vegetation dynamics in an alpine river basin of the Ti-bet Plateau, China[J]. *Journal of Hydrology*, 2021, 600: 126532.
- [18] 范倩倩. 海河流域植被覆盖时空演变及其对多时间尺度干旱响应[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2020. [Fan Qianqian. Spatiotempo-ral Evolution of Vegetation Cover and Its Response to Multi-time Scale Drought in the Haihe River Basin[D]. Handan: Hebei Uni-versity of Engineering, 2020.]
- [19] 顾锡玲, 郭恩亮, 银山, 等. 干旱对内蒙古植被生长的累积与滞-后影响评估研究[J]. *草地学报*, 2021, 29(6): 1301–1310. [Gu Xil-ing, Guo Enliang, Yin Shan, et al. Assessment of the cumulative and lagging effects of drought on vegetation growth in Inner Mon-golia[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2021, 29(6): 1301–1310.]
- [20] van der Molen M K, Dolman A J, Ciais P, et al. Drought and eco-system carbon cycling[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2011, 151(7): 765–773.
- [21] Wagle P, Xiao X, Torn M S, et al. Sensitivity of vegetation indices and gross primary production of tallgrass prairie to severe drought [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2014, 152: 1–14.
- [22] Ciais P, Reichstein M, Viovy N, et al. Europe-wide reduction in primary productivity caused by the heat and drought in 2003[J]. *Nature*, 2005, 437(7058): 529–533.
- [23] 杨铭珂. 贵州省总初级生产力的时空分布特征及对干旱变化的响应[D]. 贵阳: 贵州师范大学, 2022. [Yang Mingke. Spatiotem-poral Distribution of Gross Primary Productivity and Its Response

- to Drought Change in Guizhou Province[D]. Guiyang: Guizhou Normal University, 2022.]
- [24] 杨昭明, 张调风. 1961—2017年青藏高原东北部雨季降水量变化及其贡献度分析[J]. 干旱区研究, 2021, 38(1): 22–28. [Yang Zhaoming, Zhang Tiaofeng. Analysis of precipitation change and its contribution in the rainy season in the northeast Qinghai-Tibet Plateau from 1961 to 2017[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(1): 22–28.]
- [25] 赵欢. 中国北方草原物候的时空动态变化及其对气候的响应[D]. 成都: 成都理工大学, 2020. [Zhao Huan. Spatiotemporal Dynamics of Vegetation Phenology and Its Response to Climate Change in Northern China's grasslands[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2020.]
- [26] 罗馨. 青藏高原碳和水分利用效率的时空演变特征及其对气候变化和人类活动的响应[D]. 成都: 成都信息工程大学, 2020. [Luo Xin. Temporal and Spatial Evolution of Carbon and Water Use Efficiency over the Tibetan Plateau in Response to Climate Change and Human Activities[D]. Chengdu: Chengdu University of Information Technology, 2020.]
- [27] 滑永春, 萨如拉, 王冰. 内蒙古草原NPP时空变化及驱动力[J]. 中国沙漠, 2021, 41(5): 130–139. [Hua Yongchun, Sa Rula, Wang Bing. Spatial and temporal variation of grassland NPP and its driving forces in Inner Mongolia[J]. Journal of Desert Research, 2021, 41(5): 130–139.]
- [28] Li X, Xiao J. Mapping photosynthesis solely from solar-induced Chlorophyll fluorescence: A global, fine-resolution dataset of gross primary production derived from OCO-2[J]. Remote Sensing, 2019, 11(21): 2563.
- [29] Vicente-Serrano S M, Beguerfa S, Lorenzo-Lacruz J, et al. Performance of drought indices for ecological, agricultural, and hydrological applications[J]. Earth Interactions, 2012, 16(10): 1–27.
- [30] 刘扬, 杨永春, 张轲, 等. 1960—2011年河西走廊地表干湿状况的时空变化及影响因素[J]. 水土保持通报, 2015, 35(1): 54–60. [Liu Yang, Yang Yongchun, Zhang Ke, et al. Temporal and spatial variation of humidity and its influential factors in Hexi Corridor during 1960–2011[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2015, 35(1): 54–60.]
- [31] 胡琦, 马雪晴, 胡莉婷, 等. Matlab在气象专业教学中的应用——气象要素的M-K检验突变分析[J]. 实验室研究与探索, 2019, 38(12): 48–51, 107. [Hu Qi, Ma Xueqing, Hu Liting, et al. Application of matlab in meteorological teaching: M-K test for the abrupt change analysis of meteorological elements[J]. Research and Exploration in Laboratory, 2019, 38(12): 48–51, 107.]
- [32] Zhao A, Yu Q, Feng L, et al. Evaluating the cumulative and time-lag effects of drought on grassland vegetation: A case study in the Chinese Loess Plateau[J]. Journal of Environmental Management, 2020, 261: 110214.
- [33] 薛联青, 肖颖, 刘远洪, 等. 黄河流域植被水分利用效率对干旱的时空累积响应[J]. 水资源保护, 2023, 39(4): 32–41. [Xue Lianqing, Xiao Ying, Liu Yuanhong, et al. Spatiotemporal accumulation response of vegetation water use efficiency to drought in the Yellow River Basin[J]. Water Resources Protection, 2023, 39(4): 32–41.]
- [34] Wei X, He W, Zhou Y, et al. Global assessment of lagged and cumulative effects of drought on grassland gross primary production [J]. Ecological Indicators, 2022, 136: 108646.
- [35] Reichstein M, Bahn M, Ciais P, et al. Climate extremes and the carbon cycle[J]. Nature, 2013, 500(7462): 287–295.
- [36] Pei F, Li X, Liu X, et al. Assessing the impacts of droughts on net primary productivity in China[J]. Journal of Environmental Management, 2013, 114: 362–371.
- [37] Zhang T, Xu M, Zhang Y, et al. Grazing-induced increases in soil moisture maintain higher productivity during droughts in alpine meadows on the Tibetan Plateau[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2019, 269: 249–256.
- [38] 韩芳, 刘朋涛, 牛建明, 等. 50年来内蒙古荒漠草原气候干燥度的空间分布及其演变特征[J]. 干旱区研究, 2013, 30(3): 449–456. [Han Fang, Liu Pengtao, Niu Jianming, et al. Spatial distribution and evolution of climatic aridity in desert steppe in Inner Mongolia in recent 50 years[J]. Arid Zone Research, 2013, 30(3): 449–456.]
- [39] 徐清宸. 锡林郭勒盟草地碳循环对干旱的响应[D]. 曲阜: 曲阜师范大学, 2021. [Xu Qingchen. Response of Grassland Carbon Cycle to Drought in Xilin Gol League[D]. Qufu: Qufu Normal University, 2021.]
- [40] Xu K, Yang D, Yang H, et al. Spatio-temporal variation of drought in China during 1961–2012: A climatic perspective[J]. Journal of Hydrology, 2015, 526: 253–264.
- [41] Zhan C, Liang C, Zhao L, et al. Drought-related cumulative and time-lag effects on vegetation dynamics across the Yellow River Basin, China[J]. Ecological Indicators, 2022, 143: 109409.
- [42] Hoffmann A A, Camac J S, Williams R J, et al. Phenological changes in six Australian subalpine plants in response to experimental warming and year-to-year variation[J]. Journal of Ecology, 2010, 98(4): 927–937.
- [43] 姚檀栋, 朱立平. 青藏高原环境变化对全球变化的响应及其适应对策[J]. 地球科学进展, 2006, 21(5): 459–464. [Yao Tandong, Zhu Liping. The response of environmental changes on Tibet an plateau to global changes and adaptation strategy[J]. Advances in Earth Science, 2006, 21(5): 459–464.]

Time lag and cumulative effect of drought on gross primary productivity in the grasslands of northern China

WU Rina¹, LIU Buyun¹, BAO Yuhai^{2,3}

(1. School of Geographical Sciences, Liaoning Normal University, Dalian 116029, Liaoning, China; 2. School of Geographical Science, Inner Mongolia Normal University, Hohhot 010022, Inner Mongolia, China; 3. Key Laboratory of Remote Sensing and Geographic Information System of Inner Mongolia Autonomous Region, Hohhot 010022, Inner Mongolia, China)

Abstract: In recent years, with global warming, the increase of drought events has a more important impact on the photosynthesis of vegetation, and also seriously affects the balance of terrestrial ecosystems. Based on SPEI base v.2.7 and GOSIF GPP data set, this paper studies the cumulative and time-delay effects of drought on GPP in northern grassland. Sen's slope test, MK trend test and Mann-Kendall mutation test were used to study the temporal and spatial changes of GPP and SPEI during the study period. Pearson correlation analysis method was used to explore the cumulative and time-delay effects of drought on GPP in the north grasslands. The results showed that: (1) From 2001 to 2020, the annual average GPP of the northern grasslands showed a spatial distribution pattern of high in the northeast and low in the southwest, and the annual average SPEI showed a spatial distribution pattern of low in the northeast and high in the southwest, and the annual average of SPEI and GPP showed an upward trend over time. (2) Drought has a cumulative effect on 84.99% of the northern grassland, and the longest cumulative time scale is mainly concentrated in 3-4 months, covering 39.82% of the northern grassland; Drought had a lagging effect on 63.11% of the northern grassland, and mainly occurred in 7 months, covering 19.73% of the northern grasslands. (3) By comparing the variation trends of drought and drought under different water conditions, we found that the cumulative effect of drought on grassland GPP was stronger than the time-lag effect.

Keywords: grasslands of northern China; drought; gross primary productivity; time-lag effect; cumulative effect